

⑩ 日本国特許庁(JP)

⑪ 特許出願公開

⑫ 公開特許公報(A)

昭60-117181

⑬ Int.Cl.<sup>4</sup>

G 21 C 3/30  
1/08  
5/00

識別記号

庁内整理番号

D-7808-2G  
7156-2G  
7156-2G

⑭ 公開 昭和60年(1985)6月24日

審査請求 未請求 発明の数 1 (全6頁)

⑮ 発明の名称 加圧型原子炉用燃料

⑯ 特 願 昭58-224250

⑰ 出 願 昭58(1983)11月30日

⑱ 発 明 者 西 村 章 東京都千代田区神田駿河台4丁目6番地 株式会社日立製

作所内

⑲ 出 願 人 株式会社日立製作所 東京都千代田区神田駿河台4丁目6番地

⑳ 代 理 人 弁理士 高橋 明夫 外3名

### 明 細 書

発明の名称 加圧型原子炉用燃料

特許請求の範囲

1. 可燃性毒物を含む燃料棒を複数本有する加圧型原子炉用燃料において、可燃性毒物を含まない燃料棒も含めた全燃料棒の割合 $\alpha$ 、および可燃性毒物を含む燃料棒内の可燃性毒物の初期濃度 $N$ が下記関係を有することを特徴とする加圧型原子炉用燃料。

$$\alpha = \alpha e + \beta$$

$$N = \frac{r}{m-1} \alpha$$

において

$\alpha = 5 \sim 10$ 、 $\beta = -4 \sim -30$ 、 $r = 0.2 \sim 0.4$ の範囲とする。 $e$ は燃料濃縮度(wt%)、 $m$ は燃料取替割合で全炉心の $1/m$ が取替量となる数値を意味する。

発明の詳細な説明

〔発明の利用分野〕

本発明は加圧型原子炉用燃料に係り、特に長期

サイクル用原子炉に適し、在来型の加圧型原子炉も含め広く適用可能である。また適用に採して何んら機器上の仕様変更や付加物を必要としない。

〔発明の背景〕

従来から加圧水型原子炉においては、原子炉の出力あるいは反応度制御のために、

(1) 制御棒

(2) 液体ボイズン

(3) バーナブルボイズン

等の制御手段を用いていた。

このうち制御棒の制御能力は主として出力分布調整や急激な出力変動時に使用され、通常の出力運転時には炉心からほぼ全引抜されている。

原子炉は、定検から次の定検までの期間定格出力運転ができるように、あらかじめその期間の初期時点である大きさの余剰反応度を有している必要がある。この余剰反応度は燃焼に伴い徐々に小さくなり、期間末期では0となりそれ以降では出力レベルが維持できなくなる。この余剰反応度を制御し定格運転を維持するために加圧水原子炉

(以下PWR: Pressurized Water Reactor)  
では主として前記(2)の液体ボイズンを用いてきた。

しかしながら初装荷炉心や、近年主流となりつつある長期サイクル運転用の取替炉心では燃焼期間初期の余剰反応度を大きくとる必要がある。この大きな余剰反応度を制御するには先の液体ボイズンのみでは無理がある。これは液体ボイズン中の中性子吸収物質であるほう素(B)の濃度を高くして大きな余剰反応度を制御しようとする、炉心の反応度係数が正割になることによるためである。すなわち炉心内の中性子減速材である水に溶けているBの濃度は水の密度と伴に変化するため出力が上昇し水の密度が薄くなるとBの濃度も薄くなり減速効果の減少分よりもB減少による反応度増加の方が大きくなり、出力の上昇と伴に反応度が上昇することになる。

これを防ぐため前記(3)に示すバーナブルボイズンを用いている。従来型のバーナブルボイズンは第1図に示すような形式で、ステンレス等の金属のシース内にほう素酸ガラスを納めている。この

金属棒数本を燃料集合体内に挿入しバーナブルボイズンとして使用する。本型式のバーナブルボイズンは装荷量の調整が比較的自由にこなえるという利点はあるが以下に示すような欠点がある。

(1) これらバーナブルボイズンは1サイクル毎に使い捨てになり、放射性廃棄物となつて残つて行く。

この傾向は長期サイクルになりバーナブルボイズン使用量が増すに従い増加することになる。

(2) バーナブルボイズンが燃え尽きた後でも金属シースによる中性子吸収があり、この分による反応度損失がある。

(3) 燃料の濃縮度が高くなると、燃料の輸送時や貯蔵時の臨界性が制約となるが、燃料と分離することのできる従来型バーナブルボイズンではこれら輸送時や貯蔵時の反応度を下げ臨界性の余裕を増せる手段とはなりにくい。

#### (発明の目的)

本発明はPWR用の燃料においてバーナブルボイズンとしてガドリニア( $Gd_2O_3$ )を使用する

場合の最適な方法について示すものである。

#### (発明の概要)

BWRにおいては既に十分なガドリニア使用実績を有しており、このBWRにおけるガドリニア最適化手法を用いて、PWRにおける使用法について検討したものである。

ガドリニア設計において決定すべき重要な因子は次の2つである。

- (1) ガドリニア入り燃料棒本数
- (2) ガドリニア濃度

これらの因子は炉心の運転方法や仕様、他の制御手段等を考慮して決定されるべきであり、これらの条件に応じて最適設計がなされることになる。これらの条件はBWRとかなり異なることから、本発明では現状のPWRへの適用を考慮して設定した。

#### (発明の実施例)

##### 1. 液体ボイズンによる炉心制御

PWRにおいては現在、例えば17行×17列の燃料棒配列を持つ燃料集合体を用い、1100MWの

級炉心ではこの燃料を約193体装荷して炉心を構成している。この燃料集合体の例を第2図に、炉心の例を第3図に示す。

燃料集合体中には燃料棒2の他に複数本の制御棒案内シンプル3を含んでいる。PWRでは一般に全ての燃料集合体へ制御棒挿入を行なわないので、この制御棒を挿入しない燃料集合体の制御棒案内シンプル2に、従来バーナブルボイズン1を挿入していた。

本発明においてはガドリニアを燃料棒に含ませるため、ガドリニア入り燃料棒(タイプ1と呼ぶ)とガドリニア無しの燃料棒(タイプ2と呼ぶ)の2種類の燃料棒が存在し、従来のようなバーナブルボイズン1は不要になる。

通常、出力運転時には先にも述べたように制御棒はほぼ全引抜されており、炉心の反応度制御にはほとんど寄与しない。従つて燃焼に伴う余剰反応度の変化を制御するのは液体ボイズン系とバーナブルボイズンである。燃焼に伴つて液体ボイズン系のほう素濃度は減少し、バーナブルボイズン

による反応度制御能力も徐々に減少する。この燃焼に伴う変化の一例を第4図に示す。本図においてバーナブルポイズンは従来のホウ酸ガラスを仮定し、反応度はホウ素濃度に換算したものである。

本図に示すように、バーナブルポイズンが無い場合、ホウ素濃度がサイクル初期で大きくなり先に述べたように反応度制御上好ましくない。

減速材対燃料体積の比率が3.4程度のPWRの例では適切な炉水中のホウ素濃度の上限は1000ppm程度である。

逆にサイクル初期でのホウ素濃度の下限はホウ素濃度希釈の速度から制約を受ける。一般に希釈前のホウ素濃度が低い程希釈に大量の純水を必要とするため早いホウ素濃度変化に対応しにくくなる。現行の液体ポイズン系の能力を仮定し、適切なホウ素濃度変化速度を確保する上ではホウ素濃度の下限は200ppm程度が望ましい。従つてこれらの適切なホウ素濃度の範囲は第5図に示すようになる。本図に示す直線Cは反応度係数より決まる

ホウ素濃度上限、直線Dは液体ポイズン系の能力より決まる下限および直線Eは燃焼に伴い反応度劣化に見合うホウ素濃度減少を示す。従つて適切なホウ素濃度としてはこれら直線C、DおよびEで囲まれる範囲内になり、この範囲内に納まるようガドリニアの濃度および本数を決定する必要がある。さらに運転の単純化を指向した場合、ホウ素濃度の変化が小さい方が望ましい。またこのホウ素濃度一定の期間をできるだけ長くするために下限線Dに近い推移を運転できるようにガドリニア設計を行うことが最適である。

以下このようなガドリニア設計を行うことにより得られるガドリニア棒の本数および濃度の関係を示す。

## 2 ガドリニアの必要量

### 2.1 ガドリニアの反応度係数

ガドリニアに含まれるガドリニウムは、中性子吸収断面積が表1に示すように極めて大きい。

表 1

核種	存在比 (%)	熱中性子吸収断面積 ( $10^{-24} \text{ cm}^2$ )
Gd 155	14.8	61000
Gd 157	15.7	255000

従つてガドリニア棒中での熱中性子の平均自由行程は1mm以下であり、ほぼガドリニア棒の表面で吸収されると近似できる。この近似を用いるとガドリニア反応度係数 $k_{gd}$ は次式であらわされる。

$$k_{gd} = C_1 n r \quad \dots\dots(1)$$

ここで $C_1$ は定数、 $n$ は燃料集合体中のガドリニア棒の本数、 $r$ はガドリニア棒の半径である。

すなわちガドリニア反応度係数はガドリニア棒の本数および半径に比例して大きくなる。

現行PWRでは $r \approx 8 \text{ mm}$ であり $C_1 \approx 0.0013 \sim 0.0025$ であるこの数値の中はガドリニア棒の位置の違いを考慮したものである。

### 2.2 ガドリニア入り燃料棒本数および濃度の決定

ガドリニアが中性子を吸収し時間とともに変化

する様子は下記の式で表わすことができる。

$$-\frac{d}{dt} (\pi r^2 N) = 2\pi r \phi / 4 \quad \dots\dots(2)$$

ここで $N$ はガドリニア濃度、 $\phi$ は中性子束を表わす。

(2)式を解くと

$$r = r_0 - \frac{\phi t}{4 N} \quad \dots\dots(3)$$

となり、これを(1)式に代入すると

$$k_{gd} = C_1 n \left( r_0 - \frac{\phi t}{4 N} \right) \quad \dots\dots(4)$$

となる。ここで $r_0$ は燃焼初期におけるガドリニア棒の半径を表わす。

(3)式で $r = 0$ とおくと

$$t = \frac{4 r_0}{\phi} N \equiv T \quad \dots\dots(5)$$

となり、 $T$ はガドリニアの燃え尽きる時間となる。

$4 r_0 / \phi$ はほぼ一定値であるから $N$ と $T$ すなわちガドリニアの燃え尽きる時間はガドリニアの濃度に比例して長くなる。

ガドリニアの入らない燃料集合体の燃焼に伴う  
反応度  $k$  の劣化は

$$\frac{d}{dt} k = -a \phi \quad \dots\dots(6)$$

で表わすことができる。ここで  $a$  は定数 (約 0.0025)  
である。ガドリニアの入る燃料集合体の割合を  
 $1/m$  で表わすとし、燃焼を通じてホウ素濃度一  
定すなわち炉心の反応度が一定となるようガドリ  
ニアで制御するためには下記の式が成り立つ。

$$\frac{d k_{04}}{dt} = (m-1) \frac{d k}{dt} \quad \dots\dots(7)$$

すなわち

$$N = C_2 \left( \frac{n}{m-1} \right) \quad \dots\dots(8)$$

となる。ここで  $C_2 = C_1/4a$  は定数 (約 0.2  
~ 0.4) である。すなわちガドリニア棒の本数と  
ガドリニアの入っていない燃料棒の比率を濃度に  
比例させることにより炉心反応度一定とすること  
ができる。

次にホウ素濃度の上限、下限から定まるガドリ

$k_0$  は燃料の濃縮度 (e) により決まり、(e は  
wt % 単位)

$$k_0 = C_3 e + 1 \quad \dots\dots(9)$$

の関係を持つ。ここで  $C_3$  は定数 (約 0.01) で  
ある。

⑨式を⑩式に入れると

$$k_{\infty}^{soc} = \frac{2(C_3 e + 1) + (m-1)(1+L)}{m+1} \quad \dots\dots(10)$$

先の上、下限のホウ素濃度を代入することによ  
り定格出力時境界となる  $k_{\infty}$  をそれぞれ  $k_{\infty}^{ul}$ 、  
 $k_{\infty}^{ll}$  とする。したがってこの  $k_{\infty}^{soc} - k_{\infty}^{ll}$  あるいは  
 $k_{\infty}^{soc} - k_{\infty}^{ul}$  に相当する反応度をガドリニアで打  
消す必要がある。

(1) 式および⑩式を用いてこの関係を示すと以  
下ようになる。

上限を与えるガドリニア棒本数  $n^{ul}$  は

$$n^{ul} = \frac{1}{2rC_1} \{ 2(C_3 e + 1) + (m-1)(1+L) - (m+1)k_{\infty}^{ul} \} \quad \dots\dots(11)$$

下限を与えるガドリニア棒本数  $n^{ll}$  は

ニア濃度及び棒本数の制約を求める。

今 (6) 式で表わされる燃料が炉心内に  $m$  バッチの  
割合で装荷されているとすると、炉心平均として  
の無限増倍率は次式で表わされる。

サイクル初期での無限増倍率  $k_{\infty}^{soc}$  は、

$$k_{\infty}^{soc} = k_0 - \frac{(m-1)}{2} a L \quad \dots\dots(12)$$

及びサイクル末期での無限増倍率  $k_{\infty}^{soc}$  は、

$$k_{\infty}^{soc} = k_0 - \frac{(m+1)}{2} a L \quad \dots\dots(13)$$

ここで  $L$  はサイクルの長さ、 $k_0$  は寿命初期の燃  
料の持つ  $k_{\infty}$  を表わす。サイクル末期の臨界条件  
から、

$$k_{\infty}^{soc} = 1.0 + L \quad \dots\dots(14)$$

ここで  $L$  は中性子のもれによる反応度損失分 (約  
0.05) である。

(9)、(10) および (14) 式より

$$k_{\infty}^{soc} = \frac{2k_0 + (m-1)(1+L)}{m+1} \quad \dots\dots(15)$$

$$n^{ll} = \frac{1}{2rC_1} \{ 2(C_3 e + 1) + (m-1)(1+L) - (m+1)k_{\infty}^{ll} \} \quad \dots\dots(16)$$

これら  $n^{ul}$ 、 $n^{ll}$  は統一して書き直すと下記の  
ようになる。

$$n = C_4 e + C_5 \quad \dots\dots(17)$$

$C_4$ 、 $C_5$  は定数で

$$C_4 = \frac{C_3}{rC_1} \quad \dots\dots(18)$$

$$C_5 = \frac{1}{2rC_1} \{ (m-1)(1+L) - (m+1)k_{\infty}^{ll} + 2 \} \quad \dots\dots(19)$$

又、 $N$  は (8) 式より

$$N = \frac{C_2}{m-1} \cdot n \quad \dots\dots(20)$$

ここで  $k_{\infty}^{ll}$  は  $k_{\infty}^{ul}$  又は  $k_{\infty}^{ll}$  を表わすものとする。

第 5 図に示すホウ素濃度を実現する上からは、

$k_{\infty}^{ul} \approx 1.15$ 、 $k_{\infty}^{ll} \approx 1.07$  が適切である。

以上の式より  $C_4$ 、 $C_5$  および  $C_6$  を求めると  
次のようになる。

表 2  $C_s$  の値

バツケサイズ	$C_s$	
	上 限	下 限
2.	-2.0	-4.0
3	-2.5	-4.5
4	-3.0	-5.0

$$C_s = 5 \sim 1.0$$

$$C_s = 0.2 \sim 0.4$$

となる。ここで濃縮度  $e$  の単位は  $wt\%$  とする。  
以上より  $C_s$  の範囲は  $-4 \sim -3.0$  が適当である。

なお可燃性毒物としてはガドリニウムのみならずガドリニウム、ハフニウム、ニオブニウム等さらにこれらの混合物等も有効である。

## 〔発明の効果〕

本発明の適用により、

## (1) 高放射性廃棄物量低減

ガドリニウムは燃料に含まれるため、燃料と共に再処理が可能、従つて従来バーナブルポイズンのように高放射性廃棄物が出ない。

## (2) 反応度損失低減

従来バーナブルポイズンでは金属シースによる反応度損失があつたが、ガドリニウムではこのような金属シースを必要とせず反応度損失を低減できる。

## (3) 高濃縮度燃料の採用

燃料貯蔵設備や新燃料輸送時の臨界性の余裕としてガドリニウムによる反応度吸収分を考慮でき、高濃縮度化がやり易くなり、燃料経済向上する。

## (4) 運転単純化

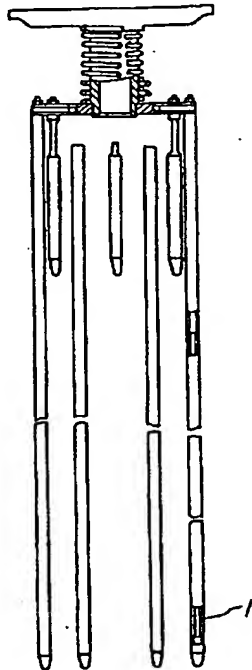
ガドリニウムの最適化によりホウ素濃度を一定にして運転しやすくなり、運転が単純化される。

## 図面の簡単な説明

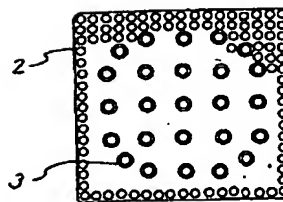
第1図は従来型バーナブルポイズンの側面図、第2図はFWR燃料集合体の水平断面図、第3図はFWR炉心の水平断面図、第4図はホウ素濃度の燃焼に伴う変化例を示す図、第5図は適切なホウ素濃度の範囲例を示す図である。

1…バーナブルポイズン棒、2…燃料棒、4…炉心バツフル。

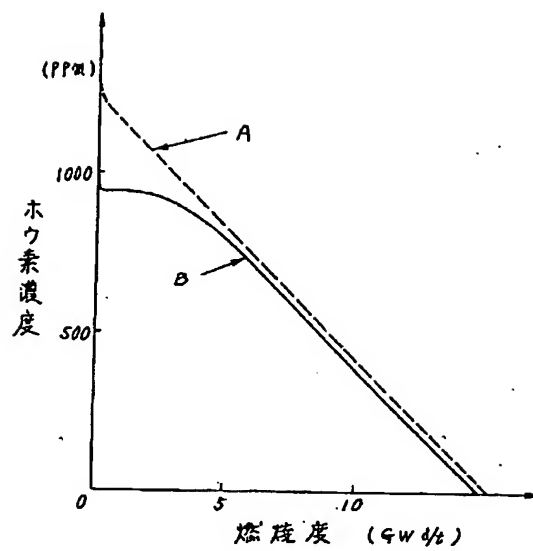
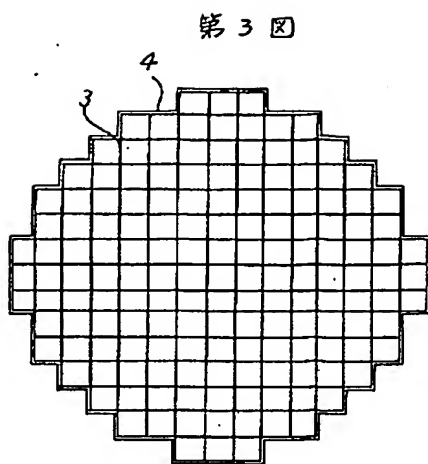
第1図



第2図



第4図



第5図

